~~133997~~
134000

C. R. Acad. Sci. Paris, t. 309, Série II, p. 2061-2067, 1989

Géologie marine/*Marine Geology*

Structure et évolution récente de la mer Égée : III, La mer de Crète

Laure MARTIN et Jean MASCLE

Résumé — Une analyse de la structure superficielle de l'Égée méridionale (mer de Crète) se fondant sur des profils de sismique réflexion continue est présentée. Ce travail aboutit à considérer trois grands domaines structuraux régis par des directions d'accidents identiques mais dont l'importance varie d'un domaine à l'autre. Le centre de la mer de Crète, en particulier, semble résulter de l'interférence de deux directions d'extension actuelle à sub-actuelle reprenant en partie des accidents distensifs antérieurs créés en liaison avec les débuts de la subduction héllénique.

Structure and recent evolution of the Aegean Sea: the Cretan Sea

Abstract — *We discuss the shallow structure of the southern Aegean sea based on the analysis of numerous continuous seismic reflection data. We recognize three main structural domains cut by a pattern of similarly trending normal faults; however, depending of the area, one fault system is prevailing on the others; in this respect, the central Cretan sea appears to result from the interaction of two distinct and recent extensions, superimposed on previous normal structures, initiated during the beginning of the Hellenic subduction.*

Abridged English Version — South of the Aegean volcanic arc and north of Crete and neighbouring islands, the Cretan sea (*Fig.* 1) develops as a back arc type basin related to the Hellenic subduction in a geodynamic setting slightly different from the one of the Tyrrhenian Sea ([1] to [4]). Onshore, the marine basin is surrounded by "alpine" units that have been cut by Upper-Miocene to recent normal faults ([11] to [17]). We used for this paper the results of numerous (about 8,000 km) continuous seismic data (chiefly single channel), recorded in the past 15 years, that have been tentatively calibrated to D.S.D.P. drillsite 378 results ([7] to [10]). Based on its bathymetry [19], the southern Aegean sea can be divided into three distinct areas: (*a*) a western sector developing off eastern Peleponnesus; this area is cut in a series of deep, disconnected basins between southern Locride and north western Crete. Their structural trends illustrate the results of a prevailing NE-SW directed still active extension also marked by numerous evidences of slumps indicating a recent to present day tectonic activity; the basin infilling seems to be made only of plioquaternary deposits; (*b*) an eastern domain towards Dodecanesus comprises a series of deep troughs such as off the islands of Karpathos and Kassos and areas of intensively fractured and narrow lineaments that may indicate tectonic strike slip corridors; (*Fig.* 2*b*) as a whole, the eastern border of the Cretan Sea shows the effects of a chiefly N-S directed extension that have induced a southern drift of the Karpathos-Kassos island block. This extension is combining with E-W potential transform zones; (*c*) the central domain, or Cretan trough, appears to result from the combination of chiefly NW-SE and NE-SW structural trends superimposed on previous E-W directed structures. Both its northern (towards the Cyclades islands) and southern margin (the Cretan margin) are cut by distensive large scale features that seem to result from an upper Miocene extension. Seismic profiles illustrate that the Northern Cretan margin is particularly cut into characteristic tilted blocks and accompanying half-grabens (*Fig.* 2*a*). However, depending on the area the effects of NW-SW, NE-SW or N-S extension may be prevailing within this structural cutting off. Finally, we observe an apparent migration through time of the tectonic activity towards the central part of the trough; such

Note présentée par Jean AUBOUIN.

0249-6313/89/03092061 $ 2.00 © Académie des Sciences

a phenomenon may indicate an extensive mechanism similar to the one documented in the Tyrrhenian Sea, where the rifting seems to have moved progressively towards the central basin.

Taking into account (*a*) the general trend of the different distensive features (*Fig.* 3), (*b*) the seismic characteristics of the basins' sedimentary infilling and (*c*) the ages as deduced from the comparison with both onshore geological evolution and D.S.D.P. 378 data, we propose that the southern Aegean sea progressive opening results from successive and superimposed extensive events that have progressively occurred in connection with the in-progress subduction-collision active at the level of the southern Hellenic margin. In a first stage (likely in upper late Miocene), extension would have been chiefly N-S directed as a direct consequence of the subduction. The resulting structural pattern is still apparent along the Cretan trough borders. In Pliocene times and after a first short compressive event that may be related to the onset of a southern incipient collision (Africa-Aegea), extension seems to have migrated towards both the western and the eastern sectors, while it was considerably decreasing in the central domain where it concentrates in the central Cretan trough. The in progress eastern collision (Turkey-Arabia) may finally interact within this geodynamic scenario, notably in leading to the tectonic activity of E-W directed tectonic corridors along the Dodecanesus margin; these new structural trends are parallel to both the Northern and Southern Aegean plate boundaries (the North Aegean trough and Levantine trench); they may initiate a progressive splitting of the Aegean domain into narrow E-W trending crustal blocks.

INTRODUCTION. — Avec la mer Thyrrénienne, la mer Égée représente l'un des deux bassins arrière-arc méditerranéens encore en cours de création sous l'effet de la subduction sous l'Europe de la plaque Afrique. Alors que l'évolution de la mer Tyrrhénienne est en partie sous le contrôle des orogènes périphériques [1], celle de l'Égée est à la fois la conséquence d'une subduction méridionale ([2], [3], [4]) et le résultat de contraintes provenant d'une « expulsion » latérale de l'ensemble anatolien [5]. L'interaction de ces deux mécanismes crée une déformation complexe où coexistent au nord les effets dominants de cisaillements ([2], [3], [4], [6]) et au sud ceux de l'extension ([4], [7]).

Les résultats que nous présentons ici se fondent sur l'analyse d'environ 8 000 km de profils de sismique réflexion continue (en majeure partie monotrace) corrélés aux résultats du forage D.S.D.P. 378 [8]. Ce travail, qui prend en compte quelques profils multitrace et travaux antérieurs ([7], [9], [10]), s'appuie sur les résultats de Néotectonique obtenus sur les domaines environnants (Péloponnèse, Crète, Cyclades, Dodécanèse, Anatolie sud-occidentale) ([11] à [17]).

L'Égée méridionale (*fig.* 1) est constituée d'une série de dépressions, s'approfondissant d'ouest en est (de 1 000 m au large du Péloponnèse oriental à 2 400 m à proximité de l'île de Karpathos), se disposant en arc de cercle entre l'archipel des Cyclades et l'arc volcanique Milos-Santorin au nord et les îles de Cythère, de Crète, de Kassos, Karpathos et Rhodes au Sud. A terre, les accidents postserravaliens découpent un bâti alpin ([11], [15]) et à partir du Miocène supérieur on constate à la périphérie du domaine marin un certain synchronisme de l'évolution structurale. Après une extension générale au Miocène supérieur, se produit un événement compressif au passage Mio-Pliocène. Cet épisode est suivi d'une extension plutôt de direction NE-SW en Péloponnèse et N-S en Crète et en Anatolie. A nouveau interrompue par un épisode compressif au Pleistocène

moyen, l'extension reprend jusqu'à nos jours, mais suivant des directions plutôt NW-SE en Attique méridionale et en Argolide, NE-SW en Anatolie, et suivant les deux orientations au sein des Cyclades et en Crète. D'une manière générale, cette évolution ne s'exprime dans la morphologie que par les seuls effets de la distension et s'accompagne d'une sédimentation à dominante continentale ou marine (très peu profonde) avec par endroits des sédiments évaporitiques du cycle messinien ([14], [16], [17]).

En mer, les résultats disponibles ([7], [9], [10]) confirment l'importance de la distension qui affecte un substratum de nature variable et a permis le dépôt de deux ensembles principaux avec, dans certains bassins, des horizons sismiques indiquant des évaporites messiniennes [10], ce que confirment les résultats du forage D.S.D.P. 378.

Le réseau sismique utilisé pour ce travail concerne principalement la mer de Crète centrale (ou fossé crétois) et occidentale.

Les marges (septentrionale et orientale) de la mer de Crète. — *La bordure septentrionale.* — Cette dernière correspond à la plate-forme des Cyclades et à l'arc volcanique de Milos et de Santorin. Les données sismiques mettent en évidence plusieurs grands bassins fortement sédimentés; (*a*) le plus occidental, au débouché du golfe de Locride, est limité par trois familles de failles respectivement de direction NW-SE, proche de N-S et de E-W, à jeu principal post-miocène; (*b*) entre Naxos et Sikinos, la plate-forme recouvre un fossé distensif, d'allongement ENE-WSW, contenant plus de 1,5 km de sédiments attribuables au seul Plioquaternaire; enfin, (*c*) entre Milos et Santorin, existe un large bassin limité par un système de horsts dissymétriques régis par des directions NNW-SSE et ENE; des séquences attribuables au Plioquaternaire reposent sur des ensembles chaotiques épais dont la présence implique une extension anté-pliocène.

Les Marges du Dodécanèse. — La bathymétrie du domaine englobant les plates-formes des îles d'Astipalaia à Karpathos et les dépressions avoisinantes traduit les effets d'un découpage structural récent, mais les données ne permettent pas de suivre avec certitude la continuité des accidents; la région proche d'Astipalaia est parcourue par des faisceaux étroits d'accidents, toujours actifs, avec de nombreuses structures en horsts basculés; l'orientation générale de ces linéaments est NE-SW.

La dépression profonde (2 400 m) dans l'ouest de Karpathos correspond quant à elle à un ensemble de deux bassins limités par des escarpements d'orientation NW-SE et NNE-SSW. Le plus méridional contient des horizons sismiques attribuables à un Messinien évaporitique. Structure superficielle et morphologie suggèrent une extension générale vers le sud-est qui aurait entraîné une « dérive » de l'ensemble Karpathos-Kassos suivant la même direction ([6], [18]).

A l'exception de la transition avec la plate-forme du Dodécanèse, l'Égée méridionale se caractérise par l'interaction de deux directions qui gouvernent les grands traits de la morphologie et de la structure superficielle. Ce sont (1) les directions du quadrant N 160 à 170, que l'on reconnaît également le long des côtes du Péloponnèse et de la Crète nord-occidentale, et (2) celles du quadrant N 70-80, qui soulignent l'allongement général de la Crète. Ces deux familles gouvernent la disposition en deux secteurs (l'un occidental, l'autre central) des dépressions profondes qui séparent le Péloponnèse et la Crète de l'arc volcanique Milos-Santorin et de la plate-forme des Cyclades au nord.

Le domaine occidental (ou marge du Péloponnèse). — Cette région, peu profonde (1 000 m), comporte un alignement de dépressions étroites, d'axe N 160, entre le débouché du golfe de Locride et le N-W de la Crète. Les profils sismiques indiquent que ces fosses

sont des éléments d'un grand bassin, le bassin d'Argolide, se développant au sein d'un socle très diffractant (prolongement immergé du bâti alpin) ou localement lité (molasses miocènes probables). Ce soubassement est recouvert d'ensembles bien stratifiés, avec des figures de glissements en masse et des « slumps » attestant d'une grande instabilité. Nous corrélons ces unités au seul Plioquaternaire, probablement très turbiditique. Les profils sismiques indiquent que le bassin d'Argolide, limité par de grands accidents distensifs (de direction N 160 à N 170, façonnant la pente du Péloponnèse), est tronçonné par des directions transverses. A l'est, la plate-forme profonde qui sépare ce bassin de l'arc volcanique et des dépressions de la mer de Crète centrale, est le lieu d'une intense fracturation en petits blocs basculés à regard S-W dont l'activité semble encore actuelle ([7], [9]).

LE DOMAINE CENTRAL DE LA MER DE CRÈTE (OU FOSSÉ CRÉTOIS). — Il s'agit d'une vaste région constituée de deux dépressions centrales (profondeur moyenne supérieure à 1 000 m) s'étendant en base de la pente continentale au nord de la Crète, le bassin d'Iraklion et le bassin de Kamilonisi.

Le bassin de Kamilonisi. — Ce dernier est un fossé très dissymétrique, de forme losangique, bordé d'escarpements qui correspondent à des plans de failles soit NW-SE, soit NE-SW. Ce fossé contient, sous une couverture récente régulière, une série de remplissage chaotique, attribuable à des dépôts terrigènes du Miocène supérieur. Son rebord septentrional est parcouru de zones à faciès acoustique sourd et à surface très chaotique; ces secteurs pourraient correspondre à des couloirs coulissants actuels, de direction ENE-WSW.

Le bassin d'Iraklion. — Il s'agit d'un vaste fossé distensif, d'allongement pratiquement est-ouest, et à fond sub-plan (voisin de 1 800 m dans la partie la plus profonde).

— *La pente continentale crétoise* qui le surplombe est elle-même découpée en une série de blocs dissymétriques, basculés vers le sud, ménageant entre eux de grands grabens fortement sédimentés. Ces derniers contiennent deux ensembles sédimentaires dont le plus profond, attribué au Miocène supérieur à terminal, offre un caractère sismique fortement chaotique et, localement, des horizons sismiques de type évaporitique [10]. L'unité supérieure, discordante, apparaît beaucoup moins affectée par les accidents normaux qui découpent un socle diffractant. Ces accidents sont des failles normales à rejet parfois très important (voisin de 1 std) de direction principale E-W et secondaire NNE-SSW. L'interaction de ces deux directions, qui sont les mêmes que celles qui découpent le bâti alpin en Crète (fossé est-ouest de la Mésara, fossé NE-SW d'Ierapetra) ([13], [14], [17]), confère à la pente septentrionale crétoise un aspect segmenté avec un dispositif structural typique de distension (blocs basculés, demi-grabens, séries syn-rift).

— *La bordure septentrionale du fossé*, en transition avec l'arc volcanique, correspond à une zone de plateaux profonds (600 à 800 m de profondeur), surface actuelle d'un grand bassin colmaté et limité par une série de blocs et grabens dissymétriques. Ces structures sont régies par les mêmes directions que celles de la marge crétoise.

— *Le bassin central ou bassin d'Iraklion* : ce bassin correspond également à un fossé dont les bordures sont des escarpements, E-W à NW-SE vers son extrémité occidentale, et plutôt NE-SW vers sa terminaison orientale. Il contient un remplissage caractérisé par trois ensembles acoustiques. Le plus profond, d'épaisseur irrégulière, est à réponse sismique chaotique mais avec quelques réflecteurs indiquant la présence d'évaporites messiniennes (ce que confirme le forage D.S.D.P. 378 [8]). L'unité intermédiaire, bien

litée et très fracturée, correspond vraisemblablement à des turbidites pliocènes. L'ensemble supérieur, en « onlap » sur les bordures du bassin, représenterait le seul Pleistocène, peu affecté par la tectonique.

D'une manière générale, ce bassin central représente une transition entre un domaine occidental (le bassin et les pentes d'Argolide), qui subit les effets d'une extension récente à actuelle (direction principale NE-SW), et un domaine oriental (le Dodécanèse) et les plate-formes de Karpathos et de Rhodes) où l'extension dominante semble être NW-SE. Les deux familles d'accidents interfèrent au sein du fossé et lui confèrent un découpage structural beaucoup plus complexe que ne le suggère sa morphologie actuelle. Compte tenu de la présence, sous les marges du bassin, de structures résultant d'une extension antérieure apparemment N-S, la structure observable résulte à la fois d'une rotation spatiale des contraintes (passant de N-S à NE-SW et NW-SE) et d'une migration dans le temps du phénomène extensif qui, après avoir affecté les bordures, serait maintenant concentré à l'axe de la mer de Crète. Il s'agirait là d'un mécanisme proche de celui qui a été mis en évidence pour la marge sarde de la mer Tyrrhénienne [1].

Conclusions. — L'analyse des profils sismiques montre clairement que :

— (1) La mer de Crète résulte essentiellement des effets de phénomènes distensifs, ainsi que plusieurs auteurs l'avaient déjà indiqué ([4], [7], [9], [14]). Cependant, la répartition des accidents permet d'y distinguer trois domaines structuraux principaux : (*a*) une bordure orientale (ou du Dodécanèse) qui semble actuellement le lieu d'une extension dominante NW-SE dans son secteur méridional [14] et dont le secteur septentrional pourrait être soumis à des mouvements de coulissement; (*b*) une bordure occidentale (marge égéenne du Péloponnèse); cette dernière contient des structures qui impliquent une distension essentiellement post-miocène de direction NE-SW ([7], [9]); (*c*) un domaine central qui résulte également d'une évolution en distension, mais associant à la fois les directions d'accidents de l'un et l'autre des domaines structuraux précédents et ceux issus d'une phase extensive plus précoce de direction N-S dont les effets sont particulièrement décelables au sein des marges septentrionale et méridionale du bassin d'Iraklion.

— (2) Bien que la fracturation du système ait abouti à isoler les dépocentres les uns des autres (et à rendre les corrélations des séquences acoustiques délicates), il est possible de proposer, pour l'évolution du domaine égéen méridional, la séquence d'événements suivants : (*a*) au cours du Miocène supérieur, une distension essentiellement N-S crée, par faillage et basculement des terrains du cycle alpin, de grands grabens qui piègent des sédiments à dominante terrigène; cette période est, à terre (en Crète), rapportée au Serravalien-Tortonien ([14], [16], [17]); (*b*) après un arrêt (peut être dû à une phase de serrage accentué à la périphérie de l'arc hellénique [20]), le domaine est soumis à une reprise de l'extension (et à une forte subsidence) durant le Pliocène et le Pleistocène mais avec des modalités différentes suivant les régions.

— (3) Une telle évolution dans le temps des directions d'extension s'accorde bien avec un modèle de subduction hellénique d'abord S-N ([4], [14], [20]), induisant au cours du Miocène supérieur une première extension, puis une réorientation de cette dernière qui devient essentiellement active face au seul bassin profond ionien sous le double effet d'un début de collision au sud de l'arc [20] (peut être souligné par la phase de compression du passage mio-pliocène) et des contraintes liées au déplacement latéral du domaine anatolien [5].

Contribution n° 518 du G.E.M.C.O. (U.R.A.-C.N.R.S. n° 718).

Note remise le 21 septembre 1989, acceptée le 8 novembre 1989.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] K. KASTENS et coll., *Proc. O.D.P. Sci. Results*, 107, College Station TX (Ocean Drilling Program) (sous presse).

[2] D. MCKENZIE, *Geophys. J. R. Astr. Soc. London*, 30, 1972, p. 109-185.

[3] D. MCKENZIE, *Geophys. J. R. Astr. Soc. London*, 55, n° 1, 1978, p. 217-254.

[4] X. LE PICHON et J. ANGELIER, *Tectonophysics*, 60, 1979, p. 1-42.

[5] J. F. DEWEY et A. M. SENGOR, *Geol. Soc. of Amer. Bull.*, 90, 90113, 1979, p. 84-92.

[6] L. MARTIN, Structure et évolution récente de la mer Égée: apports d'une étude par sismique réflexion, *Thèse de Doctorat*, Université de Paris-VI, 1987, 305 p.

[7] D. JONGSMA, A marine geophysical study of the Hellenic arc, *Ph. D. thesis*, Cambridge, 1975, 69 p.

[8] K. J. HSÜ, L. MONTADERT, D. BERNOUILLI, G. BIZON, M. CITA, A. ERICKSON, F. FABRICIUS, R. E. GARRISON, R. B. KIDO, F. MELLIERES, C. MULLER et R. C. WRIGHT, *Init. Rep. D.S.D.P.*, 42, n° 1, 1978, p. 321-357.

[9] D. JONGSMA, G. WISSMAN, F. HINZ et S. GARDE, *Meteor. Forsch. Ergebnisse Geologie und Geophysik*, C, 27, 1977, p. 3-30.

[10] BARTOLE et coll., *Boll. Oceanol. Teor. Applic.*, 4, 1983, p. 319-340.

[11] J. AUBOUIN, *Bull. Soc. géol. France*, 10, 1974, p. 3-10.

[12] J. ANGELIER, *C. R. Soc. Géol. Fr.*, 7, n° 15, 1973, p. 105-108.

[13] J. ANGELIER, *Bull. Soc. géol. France*, 18, n° 2, 1976 *a*, p. 373-381.

[14] J. ANGELIER, Néotectonique de l'arc égéen, *Thèse de Doctorat*, Université de Paris-VI et Soc. Géol. du Nord, 3, 1979, 418 p.

[15] E. BARRIER et J. ANGELIER, *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.*, 23, n° 4, 1982, p. 257-276.

[16] C. W. DROOGER et J. E. MEULENKAMP, *Bull. Soc. Geol. Greece*, 10, 1973, p. 193-200.

[17] A. R. FORTUIN, *Geol. Mijnb*, 57, n° 3, 1978, p. 451-464.

[18] J. ANGELIER, N. LYBERIS, X. LE PICHON, E. BARRIER et P. HUCHON, *Tectonophysics*, 86, 1982, p. 159-196.

[19] *Carte bathymétrique de la Méditerranée*, UNESCO, Commission océanographique internationale, 1981, feuilles 4 et 9.

[20] J. MASCLE, A. LE CLEAC'H et D. JONGSMA, *Marine Geol.*, 73, 1986, p. 145-158.

Laboratoire de Géodynamique sous-marine, U.A.-C.N.R.S. n° 718, B. P. n° 48, 06230 *Villefranche-sur-Mer.*

EXPLICATIONS DE LA PLANCHE

Fig. 1. — Bathymétrie simplifiée d'après [19] des régions sud-égéennes. I : bassin d'Iraklion; Cr : Crète; P : Péloponnèse; Cy : Cyclades; Do : Dodécanèse; An : Anatolie; K : Karpathos; Mi : Milos; Sa : Santorin; C : Cythère; Ka : Kassos; Rh : Rhodes; Ar : Argolide; Na : Naxos; Si : Sikinos; As : Astipalaia; Kam : Bassin de Kamilonisi.

Fig. 1. — Simplified bathymetric map of the southern Aegean areas from [19]; *I: Iraklion basin; Cr: Crete; P: Peloponesus; Cy: Cyclades; Do: Dodecanesus; An: Anatolia; K: Karpathos; Mi: Milos; Sa: Santorini; C: Kythira; Ka: Kassos; Rh: Rhodes; Ar: Argolide; Na: Naxos; Si: Sikinos; As: Astipalaia; Kam: Kamilonisi basin.*

Fig. 2. — Deux exemples de profils de sismique réflexion continue respectivement à travers (*a*) la marge continentale au nord de la Crète caractérisée par de grands blocs basculés scellés par le Plioquaternaire, (*b*) la plate-forme de l'île d'Astipalaia où les structures distensives sont encore actives.

Fig. 2. — Two sections of seismic lines respectively across (a) the passive margin, north of Crete (characterized by typical distensive features), (b) the vicinity of Astipalaia island, also characterized by still active, tilting blocks and accompanying half grabens.

Fig. 3. — Schéma structural simplifié de la mer de Crète; seuls les accidents dont le rejet vertical est supérieur à 0,3 std ont été représentés; en trait épais, failles à rejet cumulé supérieur à 1 std; en trait fin, failles à rejet compris entre 0,3 et 1 std; en pointillés, les principaux bassins sédimentaires plioquaternaires à terre comme en mer.

Fig. 3. — Structural sketch of the southern Aegean sea; only fault lineaments with offset more than 0.3 std have been drawn; in thick black, faults more than 1 std; in thin black, faults with throw between 0.3 and 1 std; in dotted, are shown the main Plioquaternary depocenters.

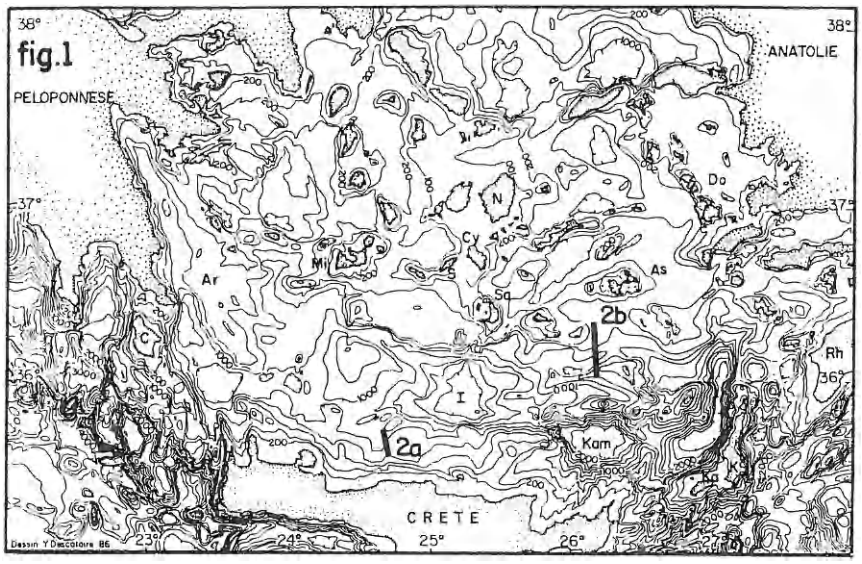
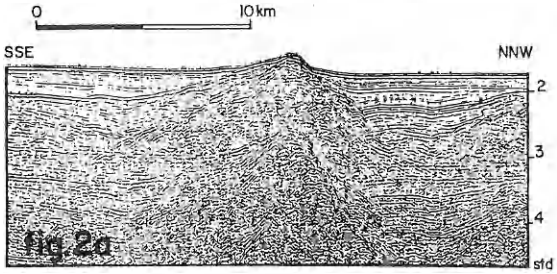
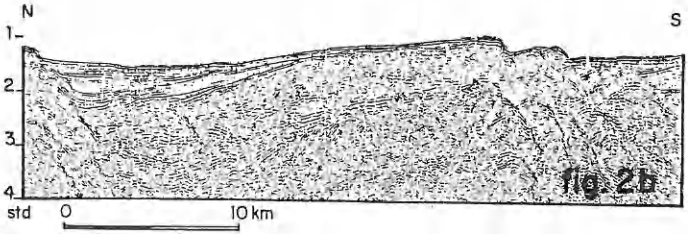
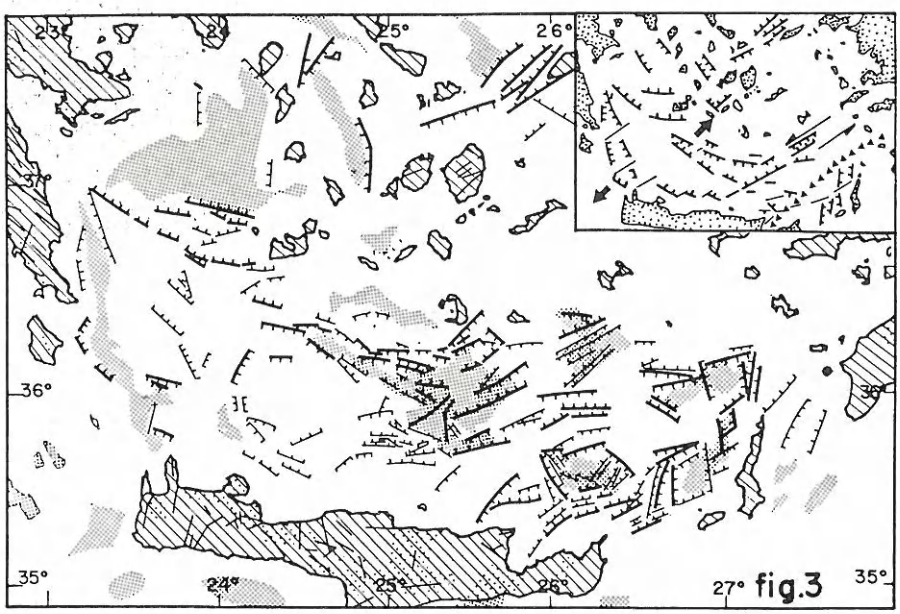


fig.1
PELOPONNESE
ANATOLIE
CRETE
38°
37°
36°
23°
24°
25°
26°
27°
N
Cy
Mi
Ar
Sq
As
Do
Rh
I
Kam
Ka
K
2a
2b
Dessin Y. Descoleure 86


0
10 km
SSE
NNW
2
3
4
std
fig.2a


N
S
1
2
3
4
std
0
10 km
fig. 2b


23°
24°
25°
26°
27°
37°
36°
35°
fig.3